

令和 5 年 6 月 22 日現在

機関番号：32201

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2020～2022

課題番号：20K04197

研究課題名（和文）単結晶チタンの切削現象の解明と集合組織を有する圧延チタン合金の切削性改善

研究課題名（英文）Cutting process of single crystal titanium and improvement of machinability in machining of rolled titanium alloy with texture

研究代表者

田村 昌一（Tamura, Shoichi）

足利大学・工学部・教授

研究者番号：80641951

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,300,000 円

研究成果の概要（和文）：圧延チタン合金は、圧延による結晶方位の異方性により、圧延方向と切削方向の相対的な角度が周期的に変化するため、工具の周期的振動や切削力に異方性が生じる。本研究では、圧延チタン合金の切削異方性を解明し、切削性改善を目指した。まず、圧延方向に切削すると、切りくず生成に要するせん断変形方向と、結晶のすべり方向が、平行に近づくため、仕上げ面品質が向上することが分かった。さらに、回転工具による溝切削の試験では、最大切削厚さの時に切削方向と圧延方向が平行になるように工具送り方向を調整することで、切削に要するエネルギーを削減できることを示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

現在、様々な産業で広く使用されている圧延チタン合金の切削加工において、材料の異方性の観点から切削特性に影響を及ぼす影響を調査し、加工性の良い切削方向や切削エネルギーを削減する工具送り方向を見出した。これはエネルギー抑制という社会的ニーズに貢献する成果と言える。また、本課題ではチタン合金を対象に研究を行ったが、他の異方性材料を切削する需要も存在している。今回の研究成果は、これらの異方性材料における具体的な切削加工の改善策にも関連するものであり、社会的な意義を持つと考えられる。

研究成果の概要（英文）：In the machining of rolled titanium alloy with a rotary tool, the cutting force varies depending on the relative angle between the cutting direction and the rolling direction due to the anisotropy in the slip system of the rolled titanium alloy. This study aimed to investigate and improve the cutting process of rolled titanium alloy. The quality of the machined surface was enhanced when the cutting direction was parallel to the rolling direction because the shear plane was aligned with the slip direction. Additionally, the cutting energy was evaluated with changing the cutter feed direction in slot milling. It was suggested that the energy was reduced by controlling the feed direction to be perpendicular to the rolling direction.

研究分野：機械加工

キーワード：チタン合金 異方性 すべり系 圧延 切削加工 せん断変形

1. 研究開始当初の背景

六方最密構造を有するチタン合金は、結晶構造上、すべり系が少なく、切削加工等の塑性変形を必要とする加工では難加工材とされている。また、切削加工を施されるチタン合金は、多くが圧延材である。チタン合金の多くは圧延によって集合組織が形成され、その結果、材料に異方性が現れる。このため、圧延方向と切削方向の相対角度に応じて切削特性が変わり、高精度・高効率な圧延チタン合金の切削加工を実施するには、被削材の異方性を考慮した加工が重要である。すなわち、集合組織によって一方向に揃ったすべり系を考慮することで、特定の切削方向において良好な切削性を見つけ出し、それに基づいて加工を行うことで、切削性を改善・向上させることが期待できる。一般的に機械加工で用いられるエンドミル等の回転工具を用いて圧延チタン合金を切削する場合でも、工具送り方向を圧延方向に対して制御することで、生産性と品質向上が期待できる。

これまで、圧延等の強塑性加工が行われた素材では、集合組織によって材料の異方性が発現することが知られており、塑性加工の研究分野では、材料の異方性に関する研究が広く行われている。しかし、切削加工の分野では、チタン等の六方最密構造の金属に関して、具体的な切削特性を調べた研究事例は限られており、塑性加工の基礎となる「結晶のすべり系」の観点から異方性材料の切削現象を解明することができれば、圧延材に対する切削現象の理解に寄与することが期待される。

2. 研究の目的

圧延チタン合金は、集合組織によって結晶方位に異方性を有するため、切削加工においては、圧延方向と切削方向の相対角度に応じて、切削力や切りくず形態が変化し、不安定な切削過程となる。そのため、切削性の改善を図るためには、圧延チタン合金の切削現象における異方性を解明し、切りくず生成時のせん断変形の基盤となる結晶方位やすべり系に関する切削特性を明確にすることが重要である。

本研究では「チタンの結晶すべり系による切削特性の異方性を解明」し、「多結晶集合組織の圧延チタン合金の切削力や切りくず生成等」とどのように関係しているのか調べることで、切削性の改善の指針を得ることを目的としている。

まず、微細切削試験を実施し、圧延チタン合金の切削特性における異方性について、基礎的な理解を深める。次に、一般的に切削加工で使われるエンドミル切削について、微細切削試験の結果を基盤に、エンドミル切削の異方性について解明する。

3. 研究の方法

(1) 被削材

本研究では、板厚 4mm の熱間圧延チタン合金 (Ti-6Al-4V) を被削材として用いた。Ti-6Al-4V は六方最密構造と体心立法構造の両構造を有するが、特に異方性を示す六方最密構造について X 線回折による被削材の圧延方向と結晶を調べ、優先的な結晶方位は圧延面法線方向に $\langle 11-20 \rangle$ 、圧延方向に $\langle 1-100 \rangle$ 、板幅方向に $\langle 0001 \rangle$ である。なお、圧延面下の残留応力に異方性は確認されていない。また、結晶方位による切削特性を理解するため、単結晶チタン材を比較材として用いた。

(2) 微細切削試験方法

立形マシニングセンタを用いて、微細切削試験を行った。圧電式切削動力計に被削材を固定し、単結晶ダイヤモンド台形バイト (50 μm の水平直線底刃と両側の側刃の傾斜角度が 60 度、刃先丸み 100nm 以下) を用いて、指定切込み深さ 10~30 μm で直線微細溝加工を行った。切削中の主

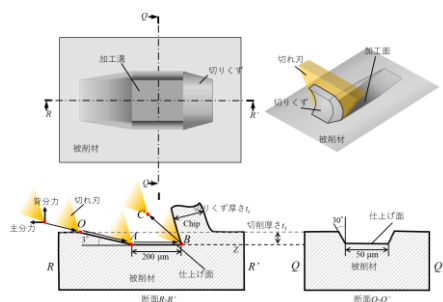


図1 微細切削試験

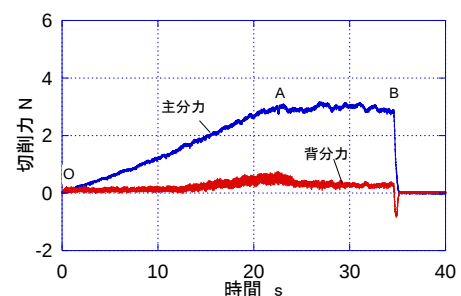


図2 切削力変化

成分と背分力を動力計で測定した。なお、切削工具はマシニングセンタの縦軸（Z 軸）にツールホルダを介して固定し、軸移動のみで主軸回転は行わず試験を行った。

図 1 に切削力測定を例示する。図中 0 から A は刃先が所定の切削厚さまで傾斜して被削材に食いつく過程であり、切削領域の増加とともに切削力が上昇している。A から B までの切削力は指定した切削厚さで切削する定常過程であり、本研究では図中 A から B までの安定した切削プロセスでの平均切削力について議論する。

切削試験は被削材の圧延方向に対して切削方向（切削方向角度）を変化させ、切削力、切りくず生成、加工後の仕上げについて評価した。ここで、圧延チタンの切削では、圧延方向に対する切削方向の相対角度、また単結晶チタンの場合は $\langle 11\text{-}20 \rangle$ に対する切削方向の相対角度を、それぞれ切削方向角度と定義する。

(3) 圧延チタン合金のエンドミル切削特性の異方性

次に、図 3 に示す立形マシニングセンタを用いて、圧延チタン合金（Ti-6Al-4V）のエンドミル溝切削試験を行った。被削材は圧電式切削動力計に固定し、切削力を測定した。直径 1mm の単結晶ダイヤモンド一枚刃エンドミルを用い、エンドミルを圧延方向に対して 0、45、90、135° に送り、溝加工を行った。ここでは、図 4 に示すとおり、圧延方向に対する工具送り方向の相対角度を工具送り方向角度とする。エンドミル切削の場合、切れ刃の切削方向は圧延方向に対して変化するため、前述の微細切削試験で定義した切削方向角度は、工具回転とともに変化する。

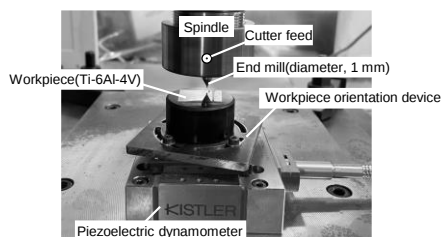


図 3 エンドミル切削試験

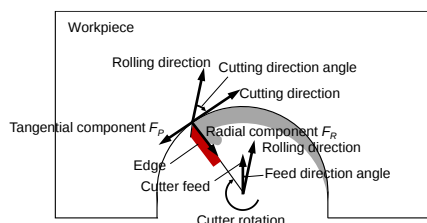


図 4 工具送り方向角度と切削方向角度の関係

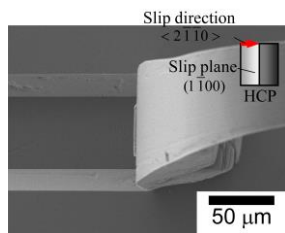
4. 研究成果

(1) チタン合金のマイクロ切削特性の異方性

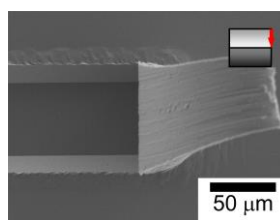
切削方向角度を変化させて、単結晶チタンと圧延チタン合金の微細溝切削試験を行った。

図 5 に単結晶チタンを切削したときの溝と未加工面の境界部断面形状を示す。切削方向角度が 0° のとき、未加工面に境界が正確に仕上げられているが、切削方向角度 45° と 90° の場合、バリが生成され、仕上げ面生成にすべり系が関与していると示されている。

図 6 に圧延チタン合金を切削したときの溝と未加工面の境界部断面形状を示す。単結晶チタンのそれと同様に、切削方向角度が 0° のとき、溝と未加工面の境界が良好な品質で分離していることが確認できる。切削方向角度が 45 度と 90 度の場合、変形の高さと幅は単結晶チタンと比較して小さいが、単結晶チタンと同様に、溝の周囲の変形は結晶方位に依存することがわかる。

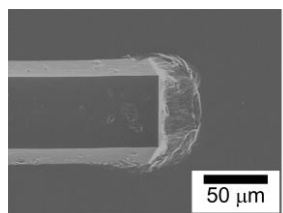


(a) 切削方向角度 0°

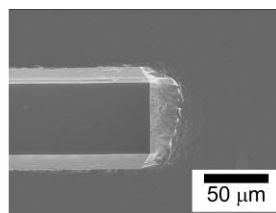


(b) 切削方向角度 90°

図 5 単結晶チタンの仕上げ面



(a) 切削方向角度 0°



(b) 切削方向角度 90°

図 6 圧延チタン合金の仕上げ面

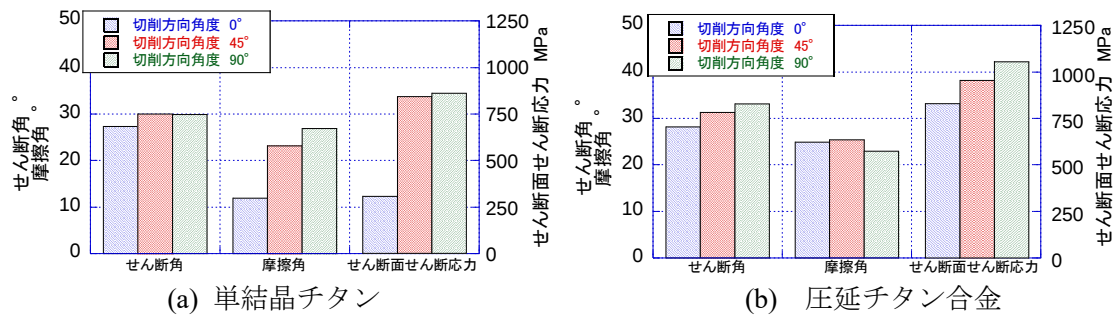


図7 切削モデルの異方性

次に、切削特性の異方性を評価するため、ここでは切りくず生成におけるせん断角、せん断面せん断応力、工具すくい面上の摩擦角から得られる単純せん断面モデルを適用して評価する。図7(a)に示す単結晶チタンの切削モデルは、せん断角が約 30° となるが、切削方向角度が 0° の場合、わずかに小さくなる。摩擦角とせん断面せん断応力は、切削方向角度とともに増加する。同図(b)の圧延チタン合金の切削モデルは、せん断角は切削方向角度が 0° の場合に最小となり、単結晶チタンの切削と同傾向となる。また、せん断面のせん断応力は、切削方向角度とともに増加し、単結晶チタンと同傾向となる。ただし、圧延チタン合金のせん断応力は純チタンのそれよりも大きい、単結晶チタンのせん断応力より大きくなる。

(2) 圧延チタン合金のエンドミル切削特性の異方性

図8にエンドミルの工具送り方向角度 0° と 90° の切削力変化を示す。なお、工具回転と測定した切削力から、接線成分（切削方向成分）と工具半径成分に分解している。参照のため切削厚さも示す。切削力の変化に異方性が見られる。例えば、最大切削力の発生が最大切削厚さのタイミングと一致していないことが挙げられる。

次に、垂直な直線刃を持つ工具の半径方向に切りくずが流出すると仮定し、最大切削厚さにおける瞬間的な切削過程を、二次元切削のせん断面切削モデルとして、接線成分 F_P と半径成分 F_R から次式を用いて切削特性を調べる。

$$\left. \begin{aligned} \phi &= \pi/4 - \beta/2 \\ \tau_s &= (F_P \cos \phi - F_R \sin \phi) \sin \phi / b t_1 \\ \beta &= \tan^{-1}(F_R / F_P) \end{aligned} \right\} (1)$$

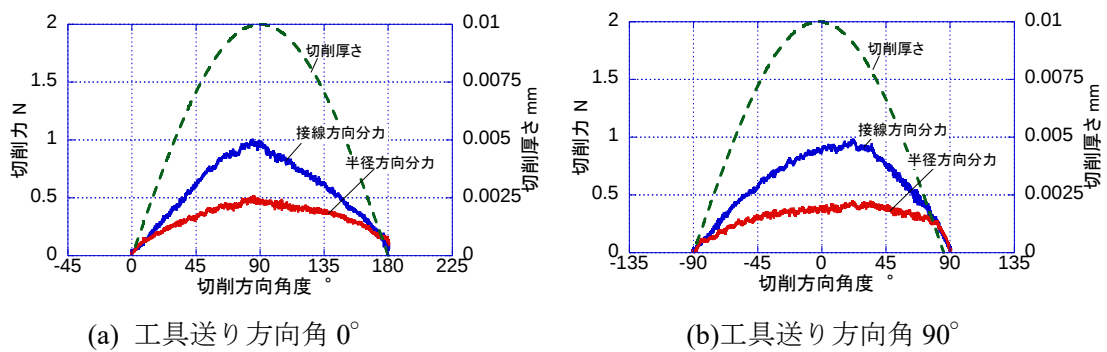


図8 エンドミル切削中の工具一回転の切削力

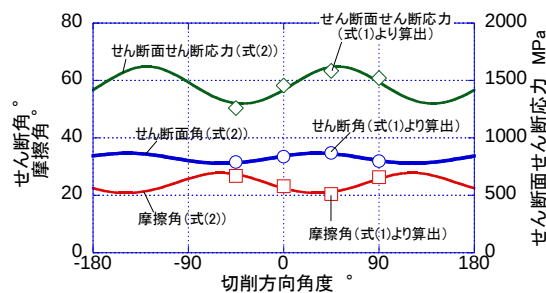


図9 せん断切削モデルの異方性

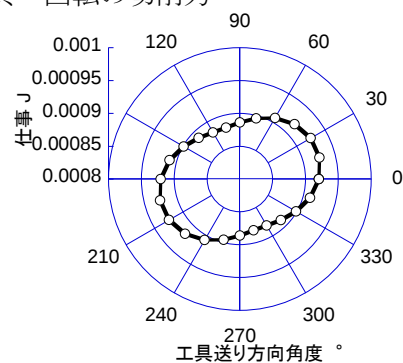


図10 切削仕事の異方性

ここで、 ϕ 、 τ_s 、 β はせん断角、せん断応力、摩擦角であり、 b は切削幅、 t_1 は切削厚さである。なお、せん断角は最小エネルギー説に基づき決定する。4つの工具送り方向角度の切削試験に基づき、切削モデルの異方性は切削方向角度に対して、次式のとおり関連付けられる。

$$\left. \begin{aligned} \phi &= \exp[-0.5557\{1 - 0.09827\cos(2\theta - 1.105)\}] \\ \tau_s &= \exp[21.10\{1 + 0.005273\cos(2\theta - 1.797)\}] \\ \beta &= \exp[-0.8665\{1 + 0.1684\cos(2\theta - 1.074)\}] \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

図9に得られた切削モデルの異方性を示す。式(1)に基づき算出した結果に対して、式(2)の変化が良く一致した。

図10に、本モデルからエンドミル溝切削における工具一回転あたりの仕事と工具送り方向角度の関係を示す。工具送り方向角度 105° のときに工具一回転あたりの仕事が最小化されることがわかる。工具送り方向角度が 105° のときの最大切削厚さは、切削方向角度が -15° である。これは切削方向角度が 0° に近く、前述の微細切削試験において示された「切削方向角度が 0° のときに切削性が良い」という結果と関連している。このため、エンドミルの切削についても、すべり系の異方性によって、切削力や切削エネルギーに異方性が生じたものと考えられる。

以上の結果から、本研究では次のことが得られた。

- ① 集合組織を有する圧延チタン合金の切削では、結晶方位の異方性によって圧延方向に切削すると、切りくず生成におけるせん断変形とすべり系のすべり方向が平行に近づく。その結果、仕上げ面品質が向上する。
- ② エンドミル溝切削において、最大切削厚さに時に切削方向角度が 0° になるように工具を送ることで、切削に要するエネルギーを小さくすることができる。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件／うち国際共著 0件／うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 TAMURA Shoichi、KABURAGI Tetsushi、KAMAKOSHI Yuichiro、MATSUMURA Takashi	4. 巻 17
2. 論文標題 Anisotropic micro cutting of rolled titanium alloy	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Journal of Advanced Mechanical Design, Systems, and Manufacturing	6. 最初と最後の頁 JAMDSM0007
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1299/jamdsm.2023jamdsm0007	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

〔学会発表〕 計2件（うち招待講演 0件／うち国際学会 2件）

1. 発表者名 田村昌一，鍋木哲志，鎌腰雄一郎，松村隆
2. 発表標題 Anisotropic micro cutting of rolled titanium alloy
3. 学会等名 International Conference on Leading Edge Manufacturing in 21st Century（国際学会）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Shoichi TAMURA, Zhongyu ZHOU, Takashi MATSUMURA
2. 発表標題 Anisotropy of Cutting Process in Milling of Rolled Titanium Alloy with Single Crystal Diamond End Mill
3. 学会等名 The 19th International Conference on Precision Engineering（国際学会）
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 （ローマ字氏名） （研究者番号）	所属研究機関・部局・職 （機関番号）	備考
研究 分担者	鍋木 哲志 (Kaburagi Tetsushi) (20522379)	群馬県立産業技術センター・その他部局等・係長 (82305)	

7．科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8．本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------